华南地区经济林果寒害研究进展

平晓燕[1];周　莉[2,3]

(1)北京林业大学草地资源与生态研究中心　北京　100083; (2) 中国气象科学研究院　北京　100081; (3) 灾害天气国家重点实验室　北京　100081

摘　要：全球气候变化背景下，经济林果的寒害敏感性和寒害风险越来越引起科学家的广泛关注。为全面了解我国华南地区经济林果寒害方面的研究现状，在综合分析近 10 年来相关文献的基础上，从寒害的定义和气象学类型、寒害的作用机理及影响因素、寒害的辨识与分级、寒害风险评估、寒害监测预警及防寒减灾措施等 6 个方面系统阐述了目前华南地区经济林果的寒害研究进展，概括了目前寒害研究存在的主要问题。为实现华南地区经济林果种植布局的合理规划、寒害的精确预报预警和经济林果业的可持续发展，未来的寒害研究要重点关注综合寒害指数的准确构建、抗寒基因的转入和定量表达、区域尺度及全球气候变化背景下的动态寒害风险评估等方面。将卫星遥感影像数据和地理信息系统(GIS)技术相结合，借助于寒害的机理性研究和野外调查结果，综合考虑物种的生物学特性和地形差异，实现寒害的准确和定量化分级、寒害的精确预警和风险区划也将是未来的研究趋势。

关键词: 华南地区; 经济林果寒害; 作用机理; 寒害指数; 寒害监测; 风险评估

中图分类号: P49　　**文献标识码:** A

Prospects and progresses in the research of chilling injury of economic forest and fruit trees in South China*

PING Xiaoyan[1], ZHOU Li[2, 3**]

(1．Research Center for Grassland Resources and Ecology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China; 3. State Key Laboratory of Severe Weather, Beijing 100081, China)

Abstract: Chilling injury has posed serious threats to the environment and agroforestry production in South China, and considerable attention has been paid to the study of species sensitivity and risk of chilling injury in the context of global climate change. In order to thoroughly understanding the current status of chilling injury research, this study summarized and reviewed the progress of chilling injury research in South China based on the relevant literatures in recent ten years. The definition and types of chilling injury, the difference between chilling injury and other commonly used types of low temperature injury, the mechanism of chilling injury and its controlling factors, the methods used for identification and classification of chilling injury, the critical temperature of chilling injury for different species in South China, elements and methods used for risk assessment of chilling injury, specific defensive practices and appropriate management strategies after chilling injury were systematically described. More researches should focus on the construction of standardized comprehensive chilling injury index, transfer and quantitative expression of cold resistant genes, dynamic and quantitative evaluation of regional chilling injury risk and risk assessment of chilling injury in the context of global climate change. Meanwhile, future research should focus on accurate and quantifiable grading of chilling injury, early warning and risk assessment of chilling injury based on technologies of remote sensing (RS) and geographic information system (GIS), integrating results of chilling injury mechanisms and field survey, and considering both the biological characteristics of certain species and the topography variation. These future researches would benefit the optimization of plant distribution pattern, accurate early warning of chilling injury and the sustainable development of economic forest and fruit trees in South China.

Keywords: South China; Chilling injury of economic forest and fruit trees; Functional mechanism; Chilling injury index; Monitory of chilling injury; Risk assessment

我国华南地区水热资源较为充足，冬暖气候资源优势显著，是我国荔枝、龙眼、枇杷、香蕉、菠萝、芒果、莲雾、青枣、腰果、瓜菜、橡胶和降香黄檀等经济林果的重要生产基地，该区域的经济林果种植已成为当地的经济支柱之一[1-4]。但受全球气候变化和季风气候的影响，这些区域在冬春季节常会遭遇寒害，导致经济林果的生长受损，甚至死亡，从而对我国华南地区的农林业生产造成严重的经济损失[2,5-11]。因此，综合分析华南地区近年来的寒害研究现状对降低寒害的经济损失和实现农林业经济的可持续发展具有重要的意义。

国外对寒害的研究主要集中在寒害对植物生长的影响机理、植物对寒害的响应和适应特征及抗寒机理等方面[12-14]。国内自 20 世纪 50 年代以来逐步开展寒害研究，主要集中在植物的寒害症状、寒害等级指标的确定、寒害的时空分布规律及寒害的风险区划等方面。近年来结合地理信息系统(GIS)和遥感(RS)技术的寒害风险评估和预报预警研究成为新的研究热点[3,10,15-17]。本文选取寒害影响最为集中、社会经济损失较为严重的我国华南地区的经济林果为研究对象，归纳和总结了该领域近十年(2008—2017 年)来的寒害研究，从寒害的定义和气象学类型、寒害的作用机理及影响因素、寒害的辨识与分级、寒害的风险评估、寒害的监测预警及寒害的防御措施等方面归纳总结了华南地区寒害研究的最新进展，探讨寒害研究中存在的问题，并对未来的研究方向进行了展望。

1　寒害的定义及气象学类型

1.1　寒害的相关定义

(1)寒害(chilling injury)：寒害的定义研究始于1896年，Molisch率先将冰点以上低温引起的植物伤害称为寒害，国内著名学者罗宗洛于 1955 年将寒害定义为“温度不低于 0 ℃时，热带和亚热带地区的植物因气温降低引起物种生理机能发生障碍，从而使植物遭受损伤的现象”，这也是当前研究者普遍采用的寒害定义[18-20]。之后，众多的研究不断的丰富和发展了寒害的定义，包括确定寒害的气象学类型和不同物种的寒害临界温度等[2,14,21-22]。在实际寒害发生过程中可能伴随霜冻、冷害或冻害，因此有必要对这几种低温灾害进行区分。罗宗洛[19]、崔读昌[20]和杜尧东等[23]先后对这几种低温灾害的受害温度、发生时期、危害症状、危害区域和危害物种进行了比较。1)冻害(freezing injury)主要发生在寒冷冬季或早春深秋，在越冬期间出现 0 ℃以下低温引起植物内部组织脱水和结冰，导致植物受害的现象；2)霜冻(frost injury)指在温暖季节出现 0 ℃以下低温冻害的现象，出现时间往往较短，目前研究集中在玉米和小麦等农作物中；3)寒害(chilling injury)主要发生于热带和亚热带地区的冬季，出现 0 ℃以上低温使植物受害的现象，受害过程时间较长；4)冷害(cold injury)主要发生于温暖季节，指植物遭受 10 ℃以上低温伤害的现象，东北地区的发生频率最高[24]；5)寒潮(cold wave)指由于强冷空气的影响，日平均气温降温幅度超过 10 ℃，极端最低气温小于 5 ℃，最冷日平均气温较常年同期偏低 5 ℃以上的气象过程。前期有较多寒害研究采用寒潮指标，近期的研究发现寒害和寒潮之间并无对应关系[5,25]。但在实际工作过程中，会把热带和亚热带地区冬季出现的寒害和冻害统称为寒害或寒冻害[25-26]。

(2)寒害临界温度(critical temperature of chilling injury)：指热带和亚热带植物受寒害影响的起始温度值，即开始低温危害的日最低气温上限值[28-29]。

(3)寒害过程(the process of chilling injury)：热带、亚热带植物遭受寒害危害的临界温度开始到结束的过程。当日最低气温≤寒害临界温度，标志寒害开始；当日最低气温>寒害临界温度，则寒害结束。日最低气温≤寒害临界温度的过程称为一个寒害过程，日最低气温≤寒害临界温度的天数之和称为过程持续日数[22,24,28,30]。

1.2　寒害的气象学类型

寒害的发生归结于冷空气的平流、辐射冷却或二者的组合，根据发生时的气象条件，寒害可被划分为辐射型、平流型及混合型寒害，也有研究将其称为干冷型、湿冷型、先干后湿型及先湿后干型寒害[25,31]。辐射型寒害也被称为干冷型寒害，是指由于辐射型低温天气过程所引起的寒害，随寒害过程日最低气温持续下降，气温日较差较大，持续时间一般较短。平流型寒害对应湿冷型寒害，是指受一个或多个平流型低温天气影响，由于低温的累积所引起的寒害。平流型寒害的日最高和最低气温随寒害过程同时陡降，伴随阴雨天气，日照时数随之降低，气温日较差较小，持续时间较长[8]。混合型寒害则是辐射降温和平流降温交替作用所形成的寒害类型，主要包括先干后湿型及先湿后干型寒害[7]。平流型寒害的发生温度一般高于辐射型寒害，但其持续时间较长，在同等低温条件下平流型寒害对植物的危害大于辐射型寒害，二者交替出现的混合型寒害的危害则更严重[28,32]。

2　寒害的作用机理及影响因素

2.1　经济林果的寒害症状

寒害会抑制经济林果植株的生长发育和植株活力，导致植株体内的生理参数发生变化，如寒害会导致芒果和火龙果等经济林果植株体内的丙二醛、可溶性糖、超氧化物歧化酶和可溶性蛋白等抗氧化物含量、细胞膜透性和电导率发生改变[12-14,33-34]。植物遭受寒害后其形态特征会发生变化，如叶片枯萎、叶片和茎干的颜色改变等，在果实生长期遭遇寒害会造成果实的颜色发生改变，果实木质化程度增加，以及烂果和落果等现象[4,35-36]。

2.2　寒害的作用机理

寒害的作用机理研究集中在寒害对经济林果植株生理过程的影响方面[12,32,37]。寒害会破坏植物的水循环、养分循环、光合作用、呼吸作用、代谢过程及种子发芽等几乎所有的生理过程[35,38-39]。其中，细胞膜透性增强和组织电解质渗出率增加是热带和亚热带地区的植物对寒害的共同生理响应特征[26,38,40]。

Lukatkin 等[35]和 Lyons[37]详细阐述了寒害对植物细胞生长和发育的影响机理(图 1)。植物在遭受寒害后，细胞膜首先会发生相变过程，由液晶态转化为固体凝胶态，这种转变会导致细胞膜破裂和透性增强，造成细胞内含物泄露和离子平衡被打破；同时，细胞膜的相变过程还会导致细胞内原生质的流动中止、植物体内能量供应减少、新陈代谢紊乱及植物光合与呼吸速率发生改变等多种影响，使植物长期处于饥饿状态，体内逐渐积累有毒代谢物质。这一机理性解释得到了众多研究者的关注、支持和验证。如研究表明寒害会增加莲雾、香蕉和灯笼椒等经济林果的细胞膜透性和体内抗氧化系统活性，植物叶片可溶性蛋白和脯氨酸含量升高，膜质过氧化程度加剧，细胞液外渗，酶活性降低，从而对其生长造成损伤[3,13-41]。最近的研究还表明寒害会导致芒果体内的编码跨膜受体、钙调节信号转导、NADPH 氧化酶、MAP 激酶等耐受基因的表达和上调，增加膜质过氧化反应，最终导致植物的死亡[42]。

寒害对植物的影响根据危害时长可分为两个层次，如植物只在低温下短暂暴露，气温很快升高，其对植物细胞的损伤是可逆的，植物的生长会受到一定的影响，但其很快能恢复到正常的新陈代谢水平；但植物长期暴露在低温环境会导致植物的细胞和组织遭遇次级寒害，造成不可逆的伤害，甚至导致植物死亡[35]。

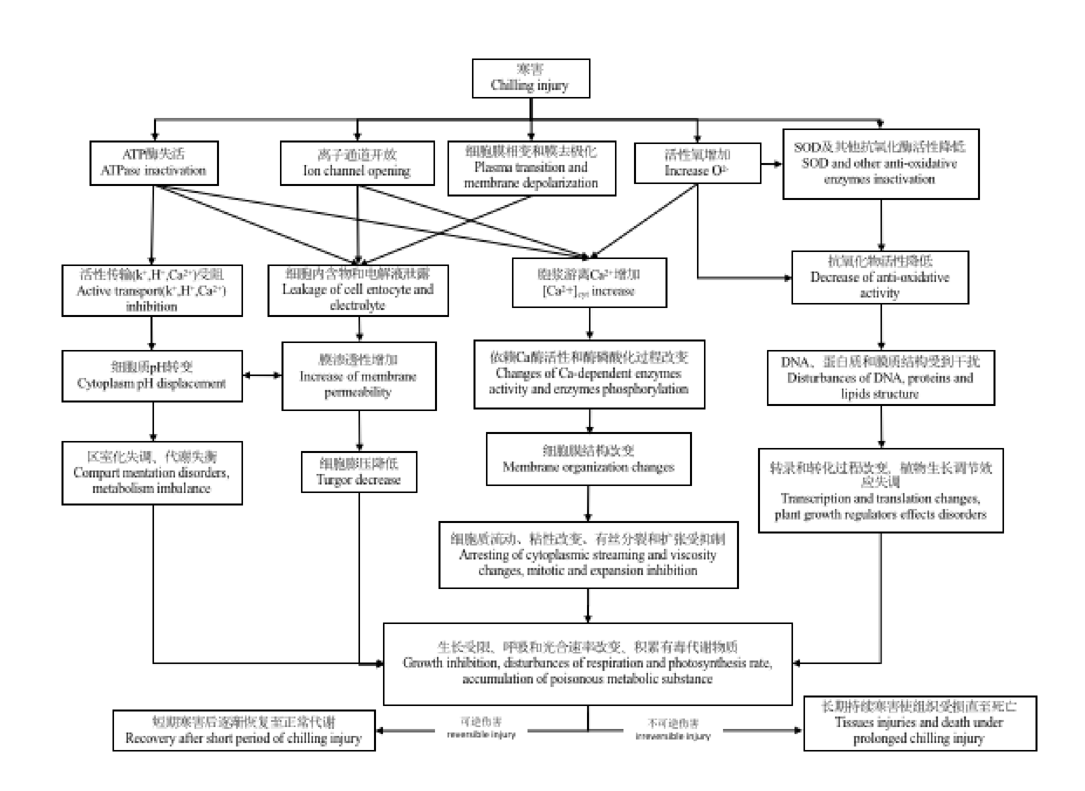


图 1　寒害对植物生长和发育的影响机理(重绘制于 Lukatkin 等[35]和 Lyons[37])

Fig. 1　The functional mechanism of chilling injury in the growth and development of plants (cited from Lukatkin et al[35] and Lyons[37])

2.3　寒害致灾程度的影响因素

寒害对经济林果的危害程度受物种类型、生长发育阶段、寒害温度和低温持续时长、地形因子及防灾减灾措施等一系列因素的综合影响[43]。

2.3.1　物种不同经济林果的耐寒性差别较大，同一经济林果不同品种之间的寒害敏感度也存在较大差异[24,44-45]。总体而言，果树等木本植物的抗寒性高于粮食作物或蔬菜等草本植物，本地种相比外来引进种具有更强的抗寒能力，迟熟品种相比早熟品种抗寒性较强[23,44-49]。

2.3.2 生长发育阶段 经济林果在不同的生长发育阶段其抗寒性差别较大[35,50]。幼苗阶段的植株抗寒性普遍较差，更易受到寒害的影响，随植株年龄的增长其抗寒能力也随之增强。此外，处于花期或果期等生殖生长期的植物耐寒性要弱于营养生长期[34,46-48]。

2.3.3 经济林果的生物学特性 经济林果自身的生理特性如体内的次生代谢物质或抗氧化物含量均会影响其抗寒性。相对而言，体内储存的用于越冬的代谢物质如糖或淀粉的含量越多，其抗寒能力越强[35,48]。同时，可溶性糖或氨基酸(如蔗糖和脯氨酸)的积累有助于降低冰点，能对蛋白质在细胞外结冰脱水后的可能变性起到防治和保护的作用，因此能提高植物的抗寒性[46]。

2.3.4 寒害温度及低温持续时长 寒害过程中的日最低气温越低，低温持续时间越长，经济林果受到的寒害越严重[10]。其中，低温持续时长会对经济林果的生长过程产生相对较大的影响。如 6 天以上的低温天气过程(最低气温达 1.5℃)会导致珠江三角洲地区的番石榴和台湾青枣植株遭遇严重危害甚至死亡，而 3 天以内的低温天气只会使番石榴和台湾青枣的生长受到轻微影响[51]。

2.3.5 地形因子 地形会通过改变植物生长的小气候来影响经济林果所受寒害的影响程度。随纬度的增加和海拔的上升，经济林果受寒害影响程度也随之增加[52-53]。坡度和坡向也会影响经济林果的寒害程度，南坡和西南坡的寒害程度相对较轻，东南坡、西坡和东坡次之，西北坡、北坡和东北坡的寒害程度最高。平流型寒害会导致坡上寒害重于坡下，辐射型寒害和混合型寒害的坡上寒害则轻于坡下[46]。经济林果在地势较高的山脊处所受到的寒害程度较低，这主要归结于地形较为开阔处冷空气不易长期沉积[52]。

2.3.6 防灾减灾措施 冬季有针对性的采取一些防灾减灾措施有助于降低寒害对经济林果的危害程度。如在冬季寒害来临前开展地膜覆盖、灌溉、覆盖干草、喷水保湿或熏烟等措施均可有效降低寒害程度。寒害发生后及时清理冻死苗木，防止病菌感染传播也有利于降低寒害程度[54]。同时，寒害程度还与经济林果的管理水平、受灾区经济水平、寒害气象预报预警和寒害的风险区划等因素相关[30,55]。

3 寒害的辨识与分级

3.1 寒害临界温度

日最低气温降低到寒害临界温度以下就判断寒害过程的开始，因此可用寒害临界温度来辨识寒害的发生。5 ℃是我国华南地区最常用的寒害临界温度。但由于不同物种的耐寒性差别较大，要准确获得寒害的辨识指标需要综合考虑物种、寒害类型、低温条件及经济林果对低温的适应能力等因素，因此寒害的临界温度相比其他农业气象灾害指标应更具针对性。通过综合近 10 年来华南地区经济林果的寒害研究，本文列出常见经济林果的寒害临界温度(表 1)。不同种类经济林果的寒害临界温度介于 0 ℃~15 ℃之间[24,28,35,46,56]。相对而言，辐射型寒害的临界温度一般显著低于平流型寒害(表 1)。

表 1 华南地区不同经济林果的寒害临界温度

Table 1 Comparison of critical temperature of chilling injury among different species in South China

寒害类型 Type of chilling injury	物种 Species	寒害临界温度(℃) Critical temperature of chilling injury	参考文献 References
辐射型寒害 Radiation chilling injury	香蕉(*Musa paradisiaca*)	4, 5	[7,17,22,44,57-60]
	柚木(*Tectona grandis*)	5	[50]
	龙眼(*Dimocarpus longan*)	0	[57]
	荔枝(*Litchi chinensis*)	0, 5	[21,57]
	橡胶(*Hevea brasiliensis*)	5	[8,61]
	火龙果(*Hylocereus polyrhizus*)	4	[26]
	番木瓜(*Carica papaya*)	10	[62]
	芒果(*Mangifera indica*)	3	[10]
	莲雾(*Syzygium samarangense*)	5	[3]

	木薯(*Manihot esculenta*)	5	[63]
	杨桃(*Averrhoa carambola*)	5	[64]
	甘蔗(*Saccharum officinarum*)	2	[27,65]
	辣椒(*Capsicum annuum*)	10, 12	[30,54,66]
	胡椒(*Piper nigrum*)	10	[67]
平流型寒害 Advective chilling injury	香蕉(*Musa paradisiaca*)	12	[22]
	橡胶(*Hevea brasiliensis*)	15	[57]
	降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)	5	[52]
	菠萝(*Ananas comosus*)	8	[68]
	甘蔗(*Saccharum officinarum*)	4	[27,65]

3.2 寒害等级划分

寒害等级用以表示承灾体遭受寒害的程度，寒害等级的确定有助于准确理解寒害对经济林果生长的影响、选育抗寒品种和进行寒害的灾情调查。目前常用的寒害分级方法包括以下几种:

(1) 田间寒害调查法 该法基于植株外观损伤的实际调查结果，通过肉眼观察寒害症状进行寒害的分级，这种方法简单有效，测定结果可直接用于寒害的灾情调查，是当前普遍采用的寒害分级方法。但其最大的缺点在于肉眼判断结果存在较大的主观性，不同研究者的寒害分级结果之间缺乏可比性[33,59];

(2) 实验室测定法 近年来也有学者尝试进行寒害等级的室内研究和测定。如 Hashim 等[59]基于后向散射成像法，利用激光二极管在 660nm 和 785nm 处的波长对香蕉果实的寒害症状进行了监测和分级，这突破了以往肉眼识别寒害特征具有较大误差这一限制。虽然实验室内定量测定寒害等级具有较好的效果，但这种方法需要将检测样品送往实验室测定，相比直观的肉眼观测存在较大的滞后性，并不适用于区域尺度的寒害快速分级[10,51];

(3) 寒害指数法 该法是基于寒害致灾机理，选择寒害的致灾因子进行分析、加权或处理后构建寒害指数用于寒害等级的划分。寒害指数的构建中，寒害致灾因子的选择是研究的重点。寒害的致灾因子随研究对象和寒害类型的变化而不同，在选取寒害的致灾因子时要综合考虑不同寒害类型的特征及其作用机理，如辐射型寒害(干冷型寒害)的特点是剧烈的降温幅度和较强的低温影响；平流型寒害(湿冷型寒害)的特点是寒害过程中的极端最低气温不一定很低，但植物长期处于低温、寡照和高湿的环境中[61]。在众多致灾因子中，日最低气温和最大降温幅度用以表征寒害过程中强冷空气入侵所带来的辐射型寒害的剧烈程度，低温持续日数和过程有害积寒则可以较好地反映中弱冷空气多次补充所造成的平流型寒害的阶梯式累积降温效应[17,21]。

根据致灾因子选取数量的不同，寒害指数可分为单因子法和多因子法。单因子法选取寒害程度的关键影响因子如极端最低气温、最大降温幅度或过程有害积寒，以此为指标构建寒害指数来进行寒害分级[69]。其优点在于资料较易获取，可以避免多个指标权重取值的困难，便于业务中的应用和推广，也能很好地用于区域尺度的寒害分级和寒害风险区划[30]。但单一因子往往不能全面地表征寒害(尤其是平流型或混合型寒害)对经济林果生长的具体影响[31]。多因子法选取多个致灾因子，构建综合寒害指数。根据各致灾因子对寒害危害程度的贡献，确定各致灾因子的权重系数。权重系数的确定方法包括主成分分析法、小波分析法、因子分析法、均方差决策法和多元回归分析法等。其优点在于极大地提高了寒害的分级精度，但其缺点在于寒害指数的指标体系和指标权重的确定方法还存在较大的主观性和不确定性[5,16,25,67]。当前研究者广泛采用杜尧东[44]提出的基于冬季极端最低气温、冬季日最低气温≤5℃持续日数、冬季日最低气温≤5℃有害积寒和冬季最大降温幅度四个致灾因子计算得出的综合寒害指数。

寒害指数法在近年来得到了较多的应用，中国气象局发布的橡胶、香蕉、龙眼、油棕和荔枝等经济林果的寒害等级行业标准均采用寒害指数法来进行寒害的分级[8,11,21,28,44,70-72]。而将寒害指数与卫星遥感影像数据和 GIS 技术相结合，能够很好地用于区域尺度的寒害分级和寒害的风险区划[16,31]。

由于经济林果的抗寒性受物种类型、植被分布区和地形特征等因素的综合影响，不同物种、及其同一物种在不同区域的寒害分级指标均会有所差异。如香蕉、龙眼和荔枝的重度寒害温度指标分别为–1.0℃、–3.5℃和–4.0℃[57]；香蕉在广西的

轻、中、重和极重寒害的极端最低温度指标分别为 7~12℃、≤7℃、≤2.5℃和≤1.5℃，在福建的寒害分级指标则为 3.0~5.0℃、1.0~3.0℃、–1.0~1.0℃和≤–1.0℃[57-58]。单一的寒害分级方法往往存在较大的局限性，因此有研究综合两种以上的寒害分级方法来确定寒害等级。如将室内控制实验和田间调查法结合来确定寒害等级，借助于寒害的机理性研究和野外实际调查结果，同时综合考虑物种的生物学特性和地形差异，能够实现寒害的准确和定量化分级，也可以为寒害的监测预警、寒害的风险区划和风险评估研究提供参考和依据[3,10]。

4　寒害的监测预警

寒害的监测是进行寒害风险评估和寒害预警研究的基础，目前寒害的监测研究已经从单一指标和方法的研究过渡到多指标和方法，并结合 3S 技术建立卫星遥感监测系统，实现了寒害的区域和动态监测[73]。寒害的预测和预警是防寒减灾的基础，有助于降低灾情损失，当前华南地区已开展较多经济林果的寒害预测预警研究，显著提高了寒害的预测时效和精度。

4.1　寒害监测

寒害的监测方法包括地面监测法和遥感监测法等。地面监测法主要是通过气象站实时观测日最低气温、日照时数和降温幅度等寒害致灾因子来进行寒害的监测。其优点在于实时性强，准确率高，但其缺点在于现有的地面气象站数量仍较为有限，且观测较为耗时耗力，也难以进行区域尺度的寒害动态监测[73-74]。为克服地面监测方法的局限，近年来遥感监测方法在寒害研究中得到了大力的推广。基于卫星遥感影像数据提取植被指数，通过对比监测期内植被指数的变化可以实现寒害程度和寒害面积的动态监测[75]。遥感监测方法具有客观、快速和精度高等优点。同时，利用光谱信息获取不同物种的植被分布图，结合 GIS 技术和数理统计方法，能够实现区域尺度不同种类经济林果寒害的针对性动态监测[15-16]。

4.2　寒害预警

寒害的预测预警需要准确且精细化的寒害气象要素预报，包括极端最低气温、日照时数等寒害致灾因子的时空精细化和准确预报，以及针对不同区域、不同物种和不同生育期开展寒害临界温度的准确研究，构建寒害低温预报预警模式，及时发布寒害致灾因子的预警信息[76]。

当前寒害预报预警研究的主要方法是建立寒害致灾因子特别是日最低气温的预报模型，结合 GIS 技术和气象站点的地理信息资料，实现区域范围内寒害的精细和动态预报[2,76]。如王加义等[74]基于福建省的 DEM 资料和 67 个气象站的气温资料，建立了日最低气温与经纬度、海拔高度等地形因子和离海远近等因子之间的预测模型。陈惠等[2]建立了福建省日最低气温的短期预报模型，结合荔枝、香蕉和龙眼等经济林果的寒害临界温度，能够实现不同物种寒害的短期精细化预报。此外，基于高分辨率的遥感影像数据和作物分布图，结合地面气象温度数据，构建不同种类经济林果的地面温度反演模型，能够实现区域尺度寒害的预测和预警[16]。也有研究利用协击法建立了寒害致灾因子的预报方程，实现了寒害的长期预报[77]。

5　寒害风险评估

寒害的风险评估是通过风险分析的手段或方法，对寒害的致灾因子强度和潜在的受灾程度进行评定和估计，以此来确定不同寒害等级的风险概率及其区域分布。寒害的风险评估有助于避减寒害的气候风险，可为经济林果的防灾减灾、寒害风险区划、种植布局的合理规划和寒害保险费率的核算提供依据[21,60,66,71]。

寒害的风险评估方法包括基于寒害强度风险指标、灾损风险指标和抗灾性能等指标的评估方法、基于历史寒害和灾损数据的风险概率评估方法、以及基于 RS/GIS 技术和数值模式等复杂仿真建模手段的评估方法等三大类[78]。当前采用较多的寒害风险评估方法是基于自然灾害风险分析理论，将寒害的致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性和防寒抗灾能力等参数进行归一化处理，基于层次分析法、熵权系数法或专家打分法等方法确定各参数的权重系数，构建寒害综合风险指数模型[30,60,79]。

5.1　寒害的风险构成要素

寒害的风险构成要素包括致灾因子、孕灾环境、承灾体灾损敏感性和防寒抗灾能力等四个部分。当前广泛采取的寒害致灾因子包括最大降温幅度、最低温度、低温持续时间和有害积寒等。华南地区冬季受蒙古高压控制，冷空气南下及多次弱冷空气的堆积均会形成寒害[23]。承灾体灾损敏感性是指承灾体遭受寒害时所表现出的度量，是承灾体耐低温能力的体现，直接关系到寒害的灾损程度。防寒抗灾能力可以分解为寒害应对能力和灾后恢复重建能力。寒害的监测与预警、寒害的风险区划、作物品种的选择和种植面积、寒害的防御技术及民众对寒害的认识等因素都会影响防寒抗灾能力[55]。

5.2　寒害的风险概率估算模型

寒害的风险概率主要由寒害强度等级风险概率、对应寒害强度的平均减产率和种植面积来估算。如果寒害数据样本较长，符合大样本序列条件，则可采用概率统计的方法构建寒害风险概率分布曲线[78]。如李娜等[21]通过对华南地区香蕉和荔枝

的长期寒害数据进行概率分布密度函数的拟合后得到了寒害的气候风险概率估算模型。但大多数寒害研究的周期相对较短，缺乏长时间序列的寒害灾损数据，采用概率统计方法得到的寒害风险概率参数和分析结果存在较大的误差。因此，应用模糊信息优化处理技术，基于信息扩散理论进行寒害风险概率的估算方法在近年来得到了广泛地应用，研究者相继对香蕉、荔枝和瓜菜等经济林果的寒害风险概率进行了估算[30,55,80-81]。

5.3 寒害的灾损评估

寒害的灾损评估主要基于不同等级寒害的减产率和种植面积来估算。寒害的减产率随寒害等级的增加而递增，介于10%~40%之间[11,22,55,80]。通过 GIS 系统集成经济林果的种植区划图、土地利用信息和地理信息等数据，结合寒害的减产序列数据，能够实现寒害灾损的定量化研究，也是当前寒害灾损研究的主要方法[55]。近年来遥感技术的不断发展为大尺度的区域寒害灾损评估提供了更有效的方法和手段，通过建立遥感植被指数与地表温度之间的反演模型，利用卫星数据开展经济林果的寒害监测，分析寒害的时空分布规律，可以解决传统寒害灾损评估方法耗时耗力等缺点，也能为寒害风险区划和寒害保险费率的研究提供支撑[15-16]。

5.4 寒害保险

为缓解寒害带来的巨大经济损失和分散风险，寒害保险近年来得到了快速的发展。其中，寒害的保险费率、保险合同及保险指数研究成为寒害领域的研究热点，研究涉及的经济林果包括香蕉、荔枝、芒果和龙眼等[55,72,82]。寒害的保险费率主要依据产量损失的数学期望、保障比例、寒害的减产率、保险免赔额等因子来计算，主要的影响因素包括气象因子特别是温度、种植者的经营管理水平、农业技术水平及经济林果品种等[30,72]。最初的寒害气象保险指数主要基于极端最低气温划分不同的寒害等级进行投保[82]。随后，研究者开始基于气象数据和产量数据，构建产量风险分布模型，对寒害的保险费率进行更为详细的厘定[30,55,80]。

6 防寒减(避)灾技术和对策

在当前全球变化的背景下，华南地区冬季气候变暖可能会导致经济林果的抗寒能力减弱，增加其寒害风险[83]。为了降低寒害的经济损失，研究者和生产管理者们在寒害灾情调查过程中和长期的生产实践过程中，摸索出众多有效的寒害防御措施和对策，具体的防寒减灾措施如下:

6.1 农艺措施

选育抗寒品种是寒害防御最为经济和有效的措施之一，也是科学合理地安排种植区划的基础。在保持农作物或经济林果产量和品质的基础上，选育具备较强抗寒能力的品种是进行寒害防御的关键[35,45,53]；其次，在气候区划和寒害风险区划的基础上，针对经济林果种植区域的地形、地势和小气候等特征，合理有效地进行物种布局，能从根本上降低寒害风险[22,30]。由于寒害较易发生在地势低洼，冷空气容易沉积的地段，因此在物种布局时应尽量选择南向、周围地形开阔、利于冷空气排出的缓坡地作为种植区，以最大程度地降低寒害风险；此外，对经济林果的果实进行采后处理如加热、控制大气成分、喷施油菜素内酯或脱落酸等也能显著降低寒害的影响[40]；最后，开展适宜的养护管理措施如合理施肥、秋季覆盖地膜、土壤松土和改土、加强病虫害防治、灾后及时清理受损组织等，均能有效增强经济林果的抗寒性和灾后恢复能力[1,50,54]。

6.2 生物化学措施

施用外源激素类物质如脱落酸、油菜素内酯、水杨酸和类胡萝卜素，以及外源活性物质如亚精胺和精胺诱导产生冷调节蛋白(CORPs)，均可以提高经济林果的过氧化物酶活性，降低叶片的相对电导率和细胞膜渗透率，提高其抗寒性[6,32,53]。此外，施用微量元素、合成类生长调节剂和抗氧化剂也可以有效提高经济林果的抗寒能力[9,35,58]。

6.3 物理措施

物理措施可以减少辐射型或平流型天气的降温幅度，从而降低寒害的影响程度。寒害发生前可采取灌溉、地膜或干草覆盖等措施来降低土壤降温幅度，寒害发生时可通过烧火堆熏烟等措施来增加地表和空气温度。局部小范围的经济林果园也可以采用鼓风机坡地鼓风来减轻贴地层的低温强度[76]。

6.4 综合措施

由于寒害的影响因素众多，因此多种防寒减灾措施相结合的综合措施能更有效地降低寒害损失。同时，准确而及时的寒害风险区划和寒害预报预警对降低寒害的经济损失也显得至关重要。气象部门及时发布冬春季节的低温预报信息，有助于寒害风险的提前防范和应急防御措施的实施[2,70]。

7 讨论与展望

7.1 存在的问题

目前已有较多针对华南地区经济林果的寒害灾情调查、寒害作用机理、寒害等级的划分及防寒减灾措施等方面的研究，但针对寒害风险评估的理论和方法、寒害的风险区划和寒害的预报预警等方面的研究仍相对薄弱。主要存在的问题体现在以下几个方面:

(1)寒害指数的构建因子单一，缺乏统一标准。经济林果的寒害致灾程度受气候、物种类型、生育期和地形条件等诸多因子的综合影响，但当前大部分研究在构建寒害指数时往往只考虑极端最低气温、有效积寒或低温持续天数等温度参数，很少有研究构建气象因子、坡度和坡向等地形因子及物种生物期等生物因子共同影响下的综合寒害指数，限制了寒害指数的精度和应用效果[25]。同时，寒害指数的构建缺乏统一规范的标准，不同研究者选取的致灾因子各不相同，并且致灾因子权重系数的确定也缺乏科学和量化的方法，人为因素明显，导致寒害指数的研究结果之间难以进行比较。

(2)抗寒品种的筛选工作仍较为落后。抗寒品种的筛选和培育是降低寒害风险和寒害经济损失的根本。前期的寒害灾情调查能为筛选抗寒种质资源提供基础，但当前大多数寒害灾情调查只是粗略筛选出具备较强抗寒性的品种或材料，很少有研究会继续开展抗寒品种的育种工作[44]。同时，我国当前的寒害育种较少运用最新的研究成果或技术手段，从而限制了部分经济林果抗寒品种的筛选和育种[32]。

(3)基于全生育期的寒害指数及寒害风险评估研究有待深入。当前，针对寒害指数、寒害风险评估、风险区划及寒害保险费率的研究多数是静态的分析，极少有针对经济林果的全生育期或寒害关键期的动态风险分析或寒害指数研究，限制了寒害的准确预警和风险区划。

7.2 研究展望

随着 RS 和 GIS 技术的不断发展，以及全球变暖背景下华南地区寒害致灾程度的不断扩大，为了实现华南地区经济林果种植布局的合理规划、寒害预警的精确模拟及经济林果业的可持续发展，未来的寒害研究要重点关注综合寒害指数的准确构建、抗寒基因的转入和定量表达、区域尺度的动态寒害风险评估及全球气候变化背景下的寒害风险评估等方面。

(1)寒害指数的测算主要依据地面气象观测站的实测数据，虽然当前气象数据的获得和监测已较为完善，但在复杂的地形条件下仍难以获得地面的气象观测数据。基于 GIS 技术构建基于经纬度、海拔和离海距离等因子的气象数据预报模型，将有助于开展区域尺度的寒害指数研究。同时，在寒害致灾因子的研究基础上，综合考虑不同物种、生育期、气象因子和地形特征，构建适用于不同经济林果的标准化综合寒害指数将是未来的研究趋势，有助于对气候变化影响下不同区域的寒害程度进行比较和区域尺度的寒害风险区划和寒害预报预警[17,21]。

(2)分子和基因工程技术是当前抗寒品种选育的新趋势和研究热点，可从根本上改变植物的抗寒能力[35]。因此，通过寒害调查丰富抗寒基因资源，利用现代生物育种技术与手段，进行经济林果抗寒高产的定向遗传改良将是未来的研究趋势。当前广泛应用于烟草、玉米、番茄和油菜等作物的抗冻物质抗冻肽已被证实具有较好的抗寒表达效果，也有研究从辣椒种子、幼苗和果实中提取水通道蛋白基因(*CaAQP*)用于转基因玉米的抗寒表达[84]。未来要重点关注这类抗冻基因在经济林果中的基因转入及抗寒基因的表达。

(3)遥感监测方法和 GIS 技术由于具备客观、快速和区域性强等特点，已被广泛用于经济林果的寒害风险评估及寒害风险区划研究[15,24,57,85]。近年来也有研究考虑不同生育期经济林果的寒害风险，尝试进行寒害风险的定量评估[11]。但植物的寒害症状往往是逐渐表现的，具有一定的滞后性，遥感监测结果不能完全反映经济林果的寒害状况，因此会影响寒害监测结果的准确性。未来应加强遥感监测和寒害实地调查结果之间的对比和联合，结合遥感方法和 GIS 技术实现寒害风险的动态和定量评估，提高寒害的遥感监测精度。

(4)华南地区经济林果的种植面积还在不断扩大，当前全球气候变化特别是暖冬化会导致种植带的不断北移，经济林果的寒害敏感性和寒害风险会随之增强，寒害带来的经济损失也会逐渐增加。因此，未来应进一步加强气候变化影响下华南地区经济林果寒害的时空分布规律、预报预警、风险评估、风险区划和保险费率核算等方面的研究，实现寒害的动态风险评估和预报预警。

参考文献 References

[1] 王金辉，梁李宏，黄伟坚,等. 氮磷钾对寒害腰果植株恢复生长结果的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1):188-190

Wang J H, Liang L H, Huang W J, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on recovery growth and fruiting of cold injured cashew[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(1):188-190

[2] 陈惠，夏丽花，王加义,等. 福建省果树寒(冻)害短期精细预报预警技术[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4):657-661

Chen H, Xia L H, Wang J Y, et al. Short-term subtle forecast and early warning methods for cold (freezing) damage of fruit trees in

Fujian Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(4): 657-661

[3] 熊弦子，唐力生，王华,等. 莲雾苗低温危害等级划分标准初探[J]. 中国农业气象, 2016, 37(6):700-710

Xiong X Z, Tang L S, Wang H, et al. Effects of low temperature stress on *Syzygiums amarangense* seedlings and its cold(frozen)injury grades index[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(6):700-710

[4] Li X, Zang C, Ge H, et al. Involvement of PAL, C4H, and 4CL in chilling injury-induced flesh lignification of loquat fruit[J]. HortScience, 2017, 52: 127-131

[5] 柏秦凤. 华南寒害致灾气候因子及综合指数研究[D]. 北京：中国气象科学研究院, 2008: 28-40

Bai Q F. Research on disaster-caused climatic factors and comprehensive index of cold damage in south China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Science, 2008: 28-40

[6] Luo Z, Chen C, Xie J. Effect of salicylic acid treatment on alleviating postharvest chilling injury of ‘Qingnai’plum fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 62: 115-120

[7] 刘世业，谭宗琨，包辉昌. 冬季低温对广西香蕉生产及产量损失影响评估初步研究[J]. 气象研究与应用, 2012, 33(3):38-42

Liu S Y, Tan Z K, Bao H C. Impacts of low temperature in winter on banana production and yield losing evaluation in Guangxi province[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2012, 33(3):38-42

[8] 刘少军，周广胜，房世波. 1961-2010 年中国橡胶寒害的时空分布特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5):1282-1288

Liu S J, Zhou G S, Fang S B. Spatial-temporal characteristics of rubber chilling injury in China during 1961-2010[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(5):1282-1288

[9] Li P, Yin F, Song L, et al. Alleviation of chilling injury in tomato fruit by exogenous application of oxalic acid[J]. Food chemistry, 2016, 202: 125-132

[10] 唐力生，王华，胡飞,等. 低温胁迫下芒果苗的受害症状及生理响应[J]. 生态学杂志, 2016, 35(10):2627-2636

Tang L S, Wang H, Hu F, et al. Cold injury symptoms and physiological responses of mango seedlings under low temperature stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(10):2627-2636

[11] 赵俊芳，余会康. 华南地区龙眼寒害灾损风险评估[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2):559-566

Zhao J F, Yu H K. Assessment on the yield loss risk of longan caused by cold damage in South China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2):559-566

[12] Vega-García M O, López-Espinoza G, Ontiveros J C, et al. Changes in protein expression associated with chilling injury in tomato fruit[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2010, 135: 83-89

[13] Sánchez-Bel P, Egea I, Sánchez-Ballesta M T, et al. Understanding the mechanisms of chilling injury in bell pepper fruits using the proteomic approach[J]. Journal of Proteomics, 2012, 75: 5463-5478

[14] Sivankalyani V, Sela N, Feygenberg O, et al. Transcriptome dynamics in mango fruit peel reveals mechanisms of chilling stress[J]. Frontiers in Plant Science. 2016, 7: 1579. doi:10.3389/fpls.2016.01579

[15] 匡昭敏，李强，尧永梅,等. EOS/MODIS 数据在甘蔗寒害监测评估中的应用[J]. 应用气象学报, 2009, 20(3):360-364

Kuang Z M, Li Q, Yao Y M, et al. Application of EOS/MODIS data to monitoring sugarcane cold damage[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(3):360-364

[16] 陈修治，陈水森，苏泳娴，等. 基于被动微波遥感的 2008 年广东省春季低温与典型作物寒害研究[J]. 遥感技术与应用，2012, 27(3): 387-395

Chen X Z, Chen S S, Su Y X, et al. Study on the low temperature and chilling injuries of typical crops using passive microwave remote sensing in Guangdong province during snow disaster of 2008. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(3): 387-395

[17] 郑璟，杜尧东，王华. 基于 GIS 的广东省香蕉寒害风险区划[J]. 广东气象, 2015, 37(3):48-50

Zheng J, Du Y D, Wang H. Study on the risk zoning of chilling injury of banana in Guangdong province based on GIS[J]. Guangdong Meteorology, 2015, 37(3):48-50

[18] 江爱良，钱平. 西双版纳坡地冬季夜间冷却过程与橡胶树寒害关系的研究[J]. 热带作物学报, 1985, 6(2): 1-12

Jiang A L, Qian P. A study of the relationship between nocturnal cooling process in winter on different-facing slopes in

Xishuangbanna and the chilling injury of Rubber trees[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 1985, 6(2): 1-12

[19] 罗宗洛，殷宏章．罗宗洛文集．北京:科学出版社. 1988: 12-20

Luo Z L, Yin H Z. The essays of Zongluo Luo. Beijing: Science Press. 1988: 12-20

[20] 崔读昌．关于冻害,寒害,冷害和霜冻[J]．中国农业气象, 1999, 20(1):56-57

Cui D C. The relationship between freezing injury, chilling injury, cold injury and frost injury[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1999, 20(1):56-57

[21] 李娜，霍治国，贺楠,等．华南地区香蕉、荔枝寒害的气候风险区划[J]．应用生态学报, 2010, 21(5):1244-1251

Li N, Huo Z G, He N, et al. Climatic risk zoning for banana and litchi's chilling injury in South China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5):1244-1251

[22] 邹瑜，吴代东，牟海飞,等．广西香蕉寒害冻害等级指标及发生规律研究[J]．西南农业学报, 2011, 24(3):941-944

Zou Y, Wu D D, Mu H F, et al. Research on grade index and occurrence law to banana chilling and freezing injury in Guangxi[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(3):941-944

[23] 杜尧东，李春梅，唐力生，等．广东地区冬季寒害风险辨识[J]．自然灾害学报, 2008, 17(5):82-86

Du YD, Li C M, Tang L S, et al. Risk identification of winter's cold damage in Guangdong Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(5):82-86

[24] 张倩，赵艳霞，王春乙．我国主要农业气象灾害指标研究进展[J]．自然灾害学报, 2010, 19(6):40-54

Zhang Q, Zhao Y X, Wang C Y. Advances in research on major agro-meteorological disaster indexes in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(6):40-54

[25] 杜裕．气候变化背景下广西冬季寒害与冻害时空分布特征研究[D]．南宁：广西大学, 2012: 50-75

Du Y. Temporal and spatial distribution of cold damage and freezing injury in the context of climate change in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2012: 50-75

[26] 袁小康，谷晓平，杨再强,等．火龙果开花坐果期寒害指标研究[J]．中国农业气象, 2014, 35(4):463-469

Yuan X K, Gu X P, Yang Z Q, et al. Study on chilling injury indices of pitaya at flowering and fruit stage[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(4):463-469

[27] 孟翠丽，谭宗琨，李紫甜．广西甘蔗寒冻害空间反演模型研究[J]．中国农业资源与区划, 2016, 37(6):15-21

Meng C L, Tan Z K, Li Z T. Research on inversion model of sugarcane's freezing damage distribution in Guangxi[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(6):15-21

[28] 霍治国，杜尧东，姜燕. QX/T 80-2007 香蕉，荔枝寒害等级[S]．北京： 中国气象局，气象出版社, 2007

Huo Z G, Du Y D, Jiang Y. QX/T 80-2007 Grade of cold damage for banana and litchi[S]. Beijing: China Meteorological Bureau, China Meteorological Press, 2007

[29] 牟海飞，吴代东，邹瑜，等．香蕉寒害及防寒栽培技术研究进展[J]．南方农业学报, 2012, 43(7):965-970

Mu H F, Wu D D, Zou Y, et al. Research progress in chilling injury of banana and its cultivation techniques against chilling[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(7):965-970

[30] 张蕾，霍治国，黄大鹏,等．海南冬季主要瓜菜寒害风险区划[J]．中国生态农业学报, 2014, 22(10):1240-1251

Zhang L, Huo Z G, Huang D P, et al. Winter chilling damage risk zoning for watermelon and vegetables in the Hainan Island[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(10):1240-1251

[31] 匡昭敏，潘学标，李莉,等. 1961-2008 年广西经济林果寒害演变特征[J]．农业工程学报, 2012, s1:201-208

Kuang Z M, Pan X B, Li L, et al. Evolutive characteristics of cold damage of economic forest fruits in Guangxi during 1961 to 2008[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, s1:201-208

[32] 王安邦，金志强，刘菊华，等．香蕉寒害研究现状及展望[J]．生物技术通报, 2014, 8:28-33

Wang A B, Jin Z Q, Liu J H, et al. The current situation and prospects of banana chilling stress[J]. Biotechnology Bulletin, 2014, 8:28-33

[33] 吕庆芳，李映志，余伟，等．持续低温引起菠萝蜜田间寒害症状调查及抗寒性分析[J]．果树学报, 2012, 29(1):81-85

Lv Q F, Li Y Z, Yu W, et al. Investigation on cold damage symptoms induced by continuous cold weather and analysis on

cold-resistant characteristics of field-grown Jackfruit[J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29(1):81-85
[34] 谷晓平，袁小康，胡家敏．火龙果幼苗和成龄树寒害指标初探[J]．中国农业气象, 2014, 35(2):214-220
Gu X P, Yuan X K, Hu J M. Indices of chilling injury for pitaya seedling and mature plant[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(2):214-220
[35] Lukatkin A S, Brazaityte A, Bobinas C, et al. Chilling injury in chilling-sensitive plants: a review[J]. Zemdirbyste, 2012, 99: 111-124
[36] Lukatkin A S. Initiation and development of chilling injury in leaves of chilling-sensitive plants[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2005, 52(4):542-546
[37] Lyons J M. Chilling injury in plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1973, 24: 445-466
[38] Huang W, Zhang S B, Cao K F. The different effects of chilling stress under moderate light intensity on photosystem II compared with photosystem I and subsequent recovery in tropical tree species[J]. Photosynthesis Research, 2010, 103(3):175-182
[39] Kalisz A, Jezdinský A, Pokluda R, et al. Impacts of chilling on photosynthesis and chlorophyll pigment content in juvenile basil cultivars[J]. Horticulture Environment & Biotechnology, 2016, 57(4):330-339
[40] Valenzuela J L, Manzano S, Palma F, et al. Oxidative stress associated with chilling injury in immature fruit: postharvest technological and biotechnological solutions[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(7):1467
[41] Jiang Y, Joyce D C, Jiang W, et al. Effects of chilling temperatures on ethylene binding by banana fruit[J]. Plant Growth Regulation, 2004, 43(2):109-115
[42] Sivankalyani V, Sela N, Feygenberg O, et al. Transcriptome dynamics in mango fruit peel reveals mechanisms of chilling stress[J]. Frontiers in Plant Science. 2016, 7: 1579. doi:10.3389/fpls.2016.01579
[43] 霍治国，王石立．农业和生物气象灾害[M]．气象出版社, 2009: 72-79
Huo Z G, Wang L S. Agricultural and Biological Meteorological Disaster[M]. China Meteorological Press, 2009: 72-79
[44] 杜尧东，李春梅，毛慧琴,等．广东省香蕉寒害综合指数的时空分布特征[J]．中国农业气象, 2008, 29(4):467-471
Du YD, Li C M, Mao H Q, et al. Temporal and spatial distribution of integrated chilling injury index for banana in Guangdong province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(4):467-471
[45] 郭文冰，赵奋成，蔡坚,等．不同种源非洲桃花心木对寒害的生理响应[J]．林业与环境科学, 2013, 29(6):7-13
Guo W B, Zhao F C, Cai J, et al. Physiological responses to cold Stress in different provenances of *Khaya senegalensis*[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2013, 29(6):7-13
[46] 阚丽艳，谢贵水，陶忠良,等．海南省 2007/2008 年冬橡胶树寒害情况浅析[J]．中国农学通报, 2009, 25(10):251-257
Han L Y, Xie G S, Tao Z L, et al. Analysis on rubber tree cold injury in 2007/2008 winter in Hainan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(10):251-257
[47] 李玫，廖宝文，管伟,等．广东省红树林寒害的调查[J]．防护林科技, 2009, 2:29-31
Li M, Liao B W, Guan W, et al. Survey on cold damage of mangroves in Guangdong province[J]. Protection Forest Science and Technology, 2009, 2:29-31
[48] 胡彦师，安泽伟，华玉伟,等．橡胶树种质资源大田种质库寒害调查报告[J]．中国农学通报, 2011, 27(25):56-59
Hu Y S, An Z W, Hua Y W, et al. Investigation on cold damage of rubber tree conserved in field Germplasm pool[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(25):56-59
[49] 唐龙祥，牛聪，杨伟波．中国椰子寒害及其对策研究[J]．热带农业科学, 2011, 31(10):92-94
Tang L X, Niu C, Yang W B. Cold Damage to Coconut and Countermeasures in China[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2011, 31(10):92-94
[50] 李运兴，梁坤南，马华明,等．柚木寒害调查与防护措施[J]．林业实用技术, 2010, 3:27-30
Li Y X, Liang K N, Ma H M, et al. Survey on chilling injury and protection practices of teak[J]. Practical Forestry Technology, 2010, 3:27-30
[51] 黄光民，刘尉，王广伦．低温对广东果树、花卉形态及花期的影响[J]．广东气象, 2010, 32(5):39-41
Huang G M, Liu W, Wang G L. The effect of low temperature on the flower morphology and flower stage of fruit trees in Guangdong province[J]. Guangdong Meteorology, 2010, 32(5):39-41

[52] 连辉明，张谦，殷祚云,等. 广东降香黄檀人工林生长及寒害调查分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(10): 26-31
Lian H M, Zhang Q, Yin Z Y, et al. Survey and analysis on growth and chilling injury of *Dalbergia odorifera* plantation in Guangdong province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(10): 26-31
[53] 林贵美，李小泉，韦绍龙,等. 2011 年早春我国香蕉寒害调查及寒害后恢复对策[J]. 南方农业学报, 2012, 43(1): 46-49
Lin G M, Li X Q, Wei S L, et al. Investigation on chilling affected banana plantations during early spring season and restoration strategies[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(1): 46-49
[54] 卢焕萍，陈蝶聪，王春林. 广东省气象灾害对冬种辣椒生产的影响[J]. 热带农业科学, 2016, 36(10):19-23
Lu H P, Chen D C, Wang C L. Effects of meteorological disasters on the pepper production in winter in Guangdong province[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2016, 36(10):19-23
[55] 蔡大鑫，王春乙，张京红,等. 基于产量的海南省香蕉寒害风险分析与区划[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7):1896-1902
Cai D X, Wang C Y, Zhang J H, et al. Cold-damage risk analysis and division of banana production in Hainan Province of South China based on yield[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(7):1896-1902
[56] Sevillano L, Sanchez-Ballesta M T, Romojaro F, et al. Physiological, hormonal and molecular mechanisms regulating chilling injury in horticultural species. Postharvest technologies applied to reduce its impact[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89: 555-573
[57] 陈惠，王加义，潘卫华,等. 南亚热带主要果树冻(寒)害指标的研究[J]. 园艺学报. 2011, 38: 2505
Chen H, Wang J Y, Pan W H, et al. Study on the chilling injury index of main fruit trees in south subtropical China[J]. Acta Horticulturae Sinica. 2011, 38: 2505
[58] 吴代东，邹瑜，牟海飞,等. 广西香蕉寒害分级标准初探[J]. 中国热带农业, 2011, 42(5):31-33
Wu D D, Zou Y, Mu H F, et al. Study on the grading standard for chilling injury of banana in Guangxi province[J]. China Tropical Agriculture, 2011, 42(5):31-33
[59] Hashim N, Pflanz M, Regen C, et al. An approach for monitoring the chilling injury appearance in bananas by means of backscattering imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116: 28-36
[60] 邹海平，王春乙，张京红,等. 海南岛香蕉寒害风险区划[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(3):130-134
Zou H P, Wang C Y, Zhang J H, et al. Risk zoning of cold damage to banana in Hainan island[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(3):130-134
[61] 陈瑶，谭志坚，樊佳庆，等. 橡胶树寒害气象等级研究[J]. 热带农业科技, 2013, 36(2):7-11
Chen Y, Tan Z J, Fan J Q, et al. Classification of chilling injury in hevea rubber based on meteorological conditions[J]. Tropical Agriculture Science & Technology, 2013, 36(2):7-11
[62] 赵志昆，岳增福，刘云彦. 2007/2008 年河口地区番木瓜寒害[J]. 热带农业科技, 2009, 32(1):24-25
Zhao Z K, Yue Z F, Liu Y Y. Cold injury on papaya in 2007/2008 in Hekou[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2009, 32(1):24-25
[63] 俞奔驰，李军，盘欢,等. 木薯寒、冻害发生规律及冻害临界温度初探[J]. 广东农业科学, 2011, 38(7):38-39
Yu B C, Li J, Pan H, et al. The occurrence regularity and critical temperature of chilling and freezing injury of *Manihot esculenta*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(7):38-39
[64] 郑小琴，杨金文，洪国平,等. 台湾软枝杨桃低温冻害分析及防冻效果评估[J]. 中国农学通报, 2009, 25(18):403-408
Zheng X Q, Yang J W, Hong G P, et al. Low-temperature freezing disaster and anti-freezing evaluation of Taiwan soft-branch star fruit[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(18):403-408
[65] 谭宗琨，黄城华，孟翠丽,等. 甘蔗寒冻害等级指标及灾损指标的初步研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(28):169-181
Tan Z K, Huang C H, Meng C L, et al. Study on the grade indexes of sugar-cane chilly injury or freezing injury and loss[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(28):169-181
[66] 谭宗琨，陈汇林，唐广田. 广西冬季露地栽培辣椒寒冻害风险评估与风险区划研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(16): 225-232
Tan Z K, Chen H L, Tang G T. Study on the risk evaluation and zonation of chilly or freezing injury of open cultivation pepper in winter in Guangxi province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(16): 225-232

[67] 王灿，杨建峰，陈小敏,等. 基于因子分析的胡椒寒害气象等级研究[J]. 热带作物学报, 2015, 36(12):2171-2178
Wang C, Yang J F, Chen X M, et al. Classification of black pepper chilling injury based on factor analysis[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(12):2171-2178
[68] 孙伟生，吴青松，窦美安,等. 菠萝寒冻害的发生及防治[J]. 中国热带农业, 2007, 2:58-59
Sun W S, Wu Q S, Dou M A, et al. The occurrence and protection practices for chilling injury of pineapple[J]. China Tropical Agriculture, 2007, 2:58-59
[69] 李娜. 华南寒害气候风险区划技术研究[D]. 北京： 中国气象科学研究院, 2010: 16-51
Li N. Research on climatic risk zoning of chilling injuries in South China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Science, 2010: 16-51
[70] 翟志宏，廖树华，姜会飞,等. 基于关键区海温的华南香蕉寒害长期预报模型探讨[J]. 灾害学, 2009, 24(4):51-57
Chu Z H, Liao S H, Jiang H F, et al. Study on seasonal forecast of banana chilling injury in south China based on sea surface temperature of key areas[J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(4):51-57
[71] 苏晓玲，龚松柏. 基于 DEM 的闽东南荔枝寒(冻)害精细化区划[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2014, 27(3):319-323
Su X L, Gong S B. Refined analysis of chilling and freezing injury of litchi in the southeast of Fujian province base on digital elevation model[J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2014, 27(3): 319-323
[72] 王春乙，张亚杰，张京红,等. 海南省芒果寒害气象指数保险费率厘定及保险合同设计研究[J]. 气象与环境科学，2016, 39(1):108-113
Wang C Y, Zhang Y J, Zhang J H, et al. Determination of the Premium Rate Based on the Weather Indices of Chilling Injury in Mangoes and Contract Design in Hainan Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39(1):108-113
[73] 郭建平. 农业气象灾害监测预测技术研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 620-630
Guo J P. Research progress on agricultural meteorological disaster monitoring and forecasting[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(5): 620-630
[74] 王加义，陈惠，夏丽花,等. 基于离海距和 GIS 技术的福建低温精细监测[J]. 应用气象学报, 2012, 23(1):96-104
Wang J Y, Chen H, Xia L H, et al. Monitoring of low temperature in Fujian based on the distance to the coastline and GIS technology[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(1):96-104
[75] 陈小敏，陈汇林，陶忠良. 2008 年初海南橡胶寒害遥感监测初探[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 24-28
Chen X M, Chen H L, Tao Z L. A preliminary study on remote sensing monitoring of rubber tree cold injury in Hainan Province during early 2008[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(1): 24-28
[76] 夏丽花，张立多，林河富,等. 福建省冬季果树冻(寒)害低温预报预警[J]. 中国农业气象, 2007, 28(2):221-225
Xia L H, Zhang L D, Lin H F, et al. Prediction and early warning of fruit tree freezing damage in winter due to low temperature in Fujian province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(2):221-225
[77] 李楠，叶彩华，廖树华,等. 利用协击方法建立广州荔枝寒害预报模型[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4):502-506
Li N, Ye C H, Liao S H, et al. Developing of chilling damage prediction model for litchi in Guangzhou based on xieji method[J]. Agricultural meteorology, 2008, 29(4):502-506
[78] 王春乙，张继权，霍治国,等. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望[J]. 气象学报, 2015, 1:1-19
Wang C Y, Zhang J Q, Huo Z G, et al. Prospects and progresses in the research of risk assessment of agro-meteorological disasters[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 1:1-19
[79] 孟丹. 基于 GIS 技术的滇南橡胶寒害风险评估与区划[D]. 南京:南京信息工程大学, 2013: 23-30
Meng D. Risk evaluation and zonation of southern Yunnan rubber chilling injury based on GIS[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013: 23-30
[80] 张京红，黄海静，王春乙,等. 基于产量风险的海南荔枝寒害保险费率研究[J]. 热带气象学报, 2015, 31(6):862-868
Zhang J H, Huang H J, Wang C Y, et al. Study on insurance rates of litchi chilling injury based on production risk in Hainan[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2015, 31(6):862-868
[81] 陈家金，王加义，黄川容,等. 福建省引种台湾青枣的寒冻害风险分析与区划[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12):1537-1544

Chen J J, Wang J Y, Huang C R, et al. Risk analysis and regionalization of cold and freezing damage to Taiwan-based Zizyphus mauritiana in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(12):1537-1544

[82] 郑小琴, 赖焕雄, 徐宗焕. 台湾热带优良水果(寒)冻害气象保险指数设计[J]. 西南农业学报, 2011, 24(4):1598-1603

Zheng X Q, Lai H X, Xu Z H. Weather insurance index design for (cold) freezing damage of Taiwan fine tropical fruits[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(4):1598-1603

[83] 李勇, 杨晓光, 王文峰,等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 Ⅴ.气候变暖对中国热带作物种植北界和寒害风险的影响分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(12):2477-2484

Li Y, Yang X G, Wang W F, et al. The Possible Effects of Global Warming on Cropping Systems in China Ⅴ.The Possible Effects of Climate Warming on Geographical Shift in Safe Northern Limit of Tropical Crops and the Risk Analysis of Cold Damage in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(12):2477-2484

[84] Yin Y X, Guo W L, Zhang Y L, et al. Cloning and characterisation of a pepper aquaporin, CaAQP, which reduces chilling stress in transgenic tobacco plants[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC), 2014, 118: 431-444

[85] Wei C, Huang J, Wang X, et al. Hyperspectral characterization of freezing injury and its biochemical impacts in oilseed rape leaves[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 195:56-66